

电机学

电力系统中的特种变压器

东南大学电气工程学院
黄允凯



东南大学
电气工程学院



1

三绕组变压器

2

自耦变压器

3

互感器

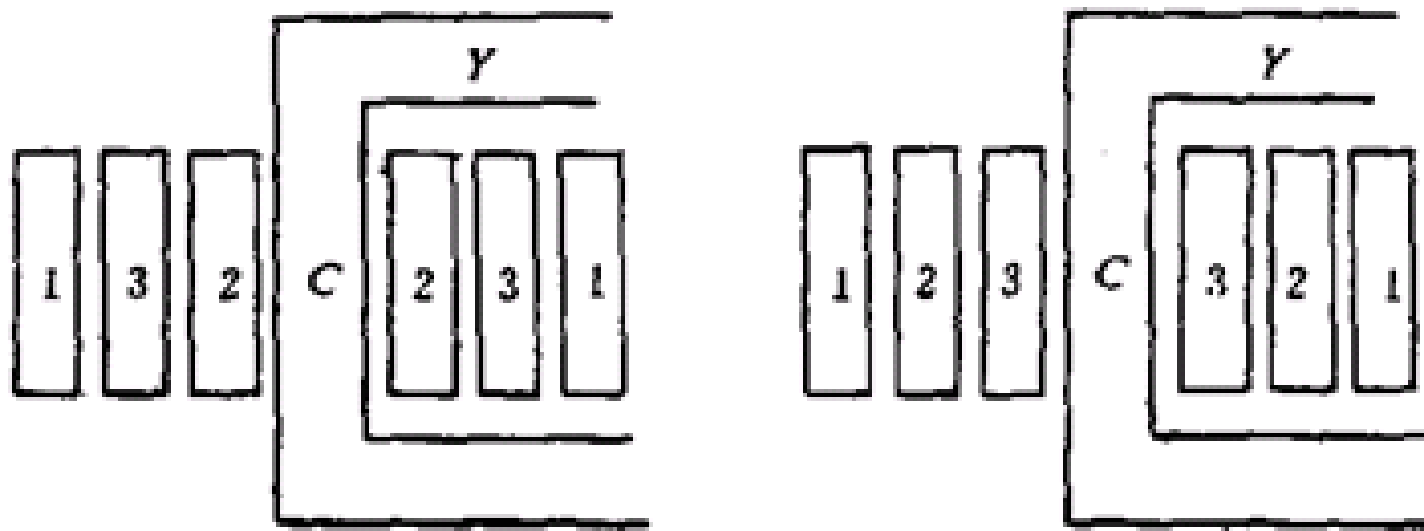




- 结构特点

三绕组变压器的结构和双绕组变压器相似，在每个铁芯柱上同心排列着三个绕组，即高压绕组1、中压绕组2、低压绕组3

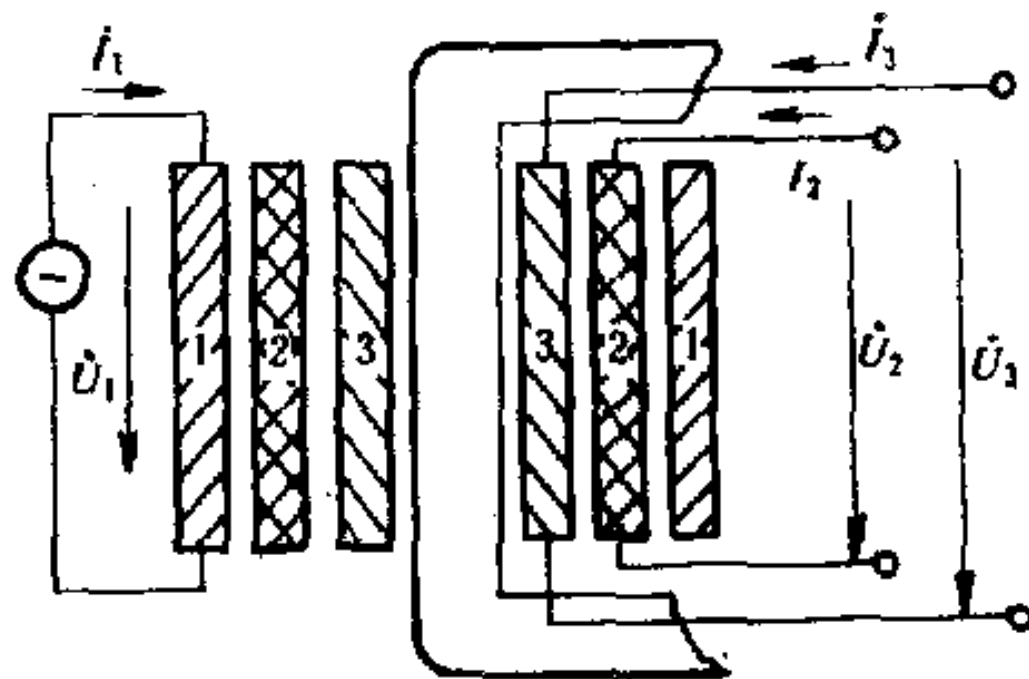
相互间传递功率较多的绕组应当靠得近些





电压方程式

- 以降压变压器为例，从高压电网传送来的功率分别传送到中压电网和低压电网。 U_1 、 U_2 、 U_3 分别表示高压、中压和低压电压。
- 用每一绕组的自感系数和各绕组间的互感系数作为基本参数。令 L_1 、 L_2 、 L_3 为各绕组自感系数， $M_{12}=M_{21}$ 为1与2绕组间互感系数； $M_{13}=M_{31}$ 为1与3绕组间互感系数； $M_{23}=M_{32}$ 为绕组2与3间互感系数。





- 当外施电压为正弦波且稳定运行时，电压方程式：

$$\dot{U}_1 = r_1 \dot{I}_1 + j\omega L_1 \dot{I}_1 + j\omega M_{12} \dot{I}_2 + j\omega M_{13} \dot{I}_3$$

$$-\dot{U}_2 = r_2 \dot{I}_2 + j\omega L_2 \dot{I}_2 + j\omega M_{21} \dot{I}_1 + j\omega M_{23} \dot{I}_3$$

$$-\dot{U}_3 = r_3 \dot{I}_3 + j\omega L_3 \dot{I}_3 + j\omega M_{31} \dot{I}_1 + j\omega M_{32} \dot{I}_2$$

L_1 、 L_2 、 L_3 为各绕组自感系数

$M_{12}=M_{21}$ 为1与2绕组间互感系数

$M_{13}=M_{31}$ 为1与3绕组间互感系数

$M_{23}=M_{32}$ 为绕组2与3间互感系数

$$k_{12} = \frac{N_1}{N_2}$$

$$k_{13} = \frac{N_1}{N_3}$$

$$k_{23} = \frac{N_2}{N_3} = \frac{k_{13}}{k_{12}}$$





归算至初级侧的电压方程：

$$\dot{U}_1 = r_1 \dot{I}_1 + j\omega L_1 \dot{I}_1 + j\omega M'_{12} \dot{I}'_2 + j\omega M'_{13} \dot{I}'_3$$

$$-\dot{U}'_2 = r'_2 \dot{I}'_2 + j\omega L'_2 \dot{I}'_2 + j\omega M'_{21} \dot{I}_1 + j\omega M'_{23} \dot{I}'_3$$

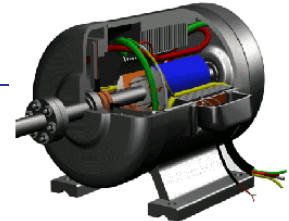
$$-\dot{U}'_3 = r'_3 \dot{I}'_3 + j\omega L'_3 \dot{I}'_3 + j\omega M'_{31} \dot{I}_1 + j\omega M'_{32} \dot{I}'_2$$

磁势平衡式：

$$N_1 \dot{I}_1 + N_2 \dot{I}_2 + N_3 \dot{I}_3 = N_1 \dot{I}_0$$

$$\dot{I}_1 + \dot{I}'_2 + \dot{I}'_3 = \dot{I}_0$$





忽略励磁电流，做简化处理，定义：

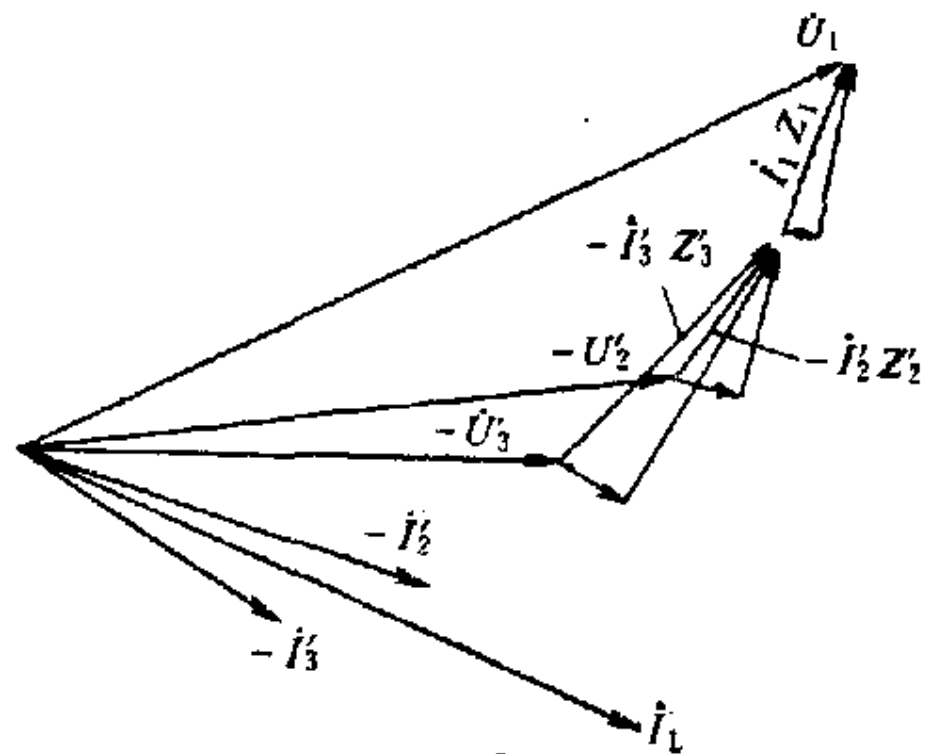
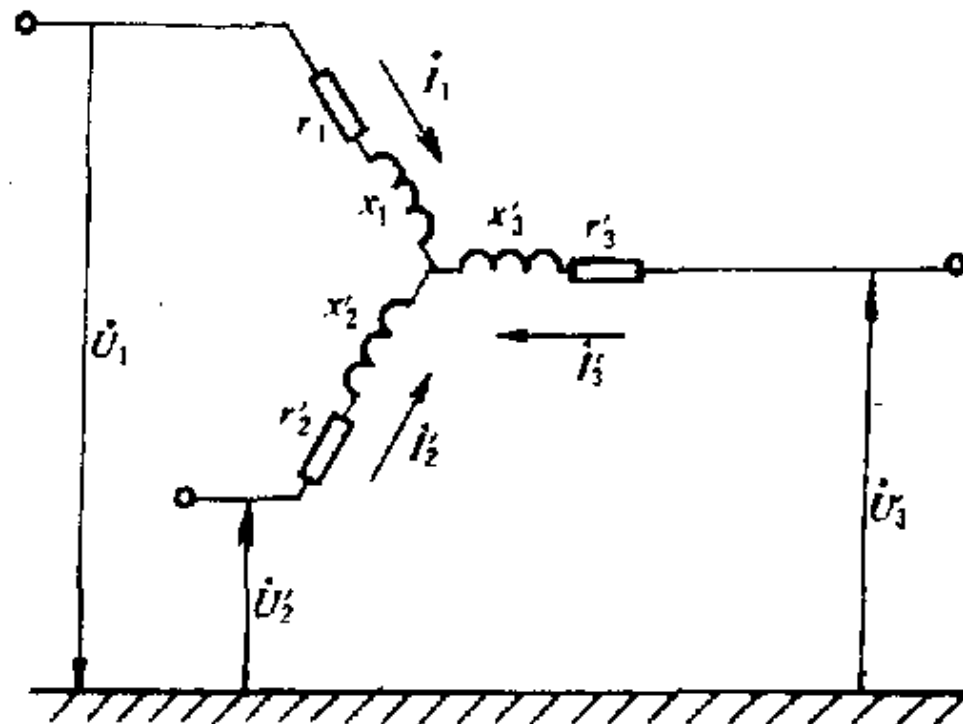
$$\begin{aligned}x_1 &= \omega(L_1 - M'_{12} - M'_{13} + M'_{23}) \\x'_2 &= \omega(L_2 - M'_{12} - M'_{23} + M'_{13}) \\x'_3 &= \omega(L_3 - M'_{13} - M'_{23} + M'_{12})\end{aligned}$$

组合电抗 x_1 、 x_2 、 x_3 ，是各绕组的自感电抗以及各绕组间的互感电抗的组合，具有漏电抗的性质。

$$\left. \begin{aligned}\dot{U}_1 - (-\dot{U}'_2) &= (r_1 + jx_1)\dot{I}_1 - (r'_2 + jx'_2)\dot{I}'_2 = Z_1\dot{I}_1 - Z'_2\dot{I}'_2 \\ \dot{U}_1 - (-\dot{U}'_3) &= (r_1 + jx_1)\dot{I}_1 - (r'_3 + jx'_3)\dot{I}'_3 = Z_1\dot{I}_1 - Z'_3\dot{I}'_3\end{aligned}\right\}$$



三绕组变压器





组合参数的实验测定：

- 进行三次不同的短路试验测定每两绕组间的短路阻抗 z_{k12} 、 z_{k13} 、 z_{k23} ，再分离出 r_1 、 r_2 、 r_3 和 x_1 、 x_2 、 x_3
- x_1 、 x_2 、 x_3 的数值与各绕组在铁芯上的相对位置有关。
降压变压器按图5—1 (b) 排列，中压绕组放在中间，高、低压绕组距离为最大， x_{k13} 最大，约为 x_{k12} 、 x_{k23} 之和。

标准连接组：

- 三相三绕组变压器的标准连接组为YN，yn0，d11和YN，yn0，y0
- 单相三绕组变压器的标准连接组为I，I0，10





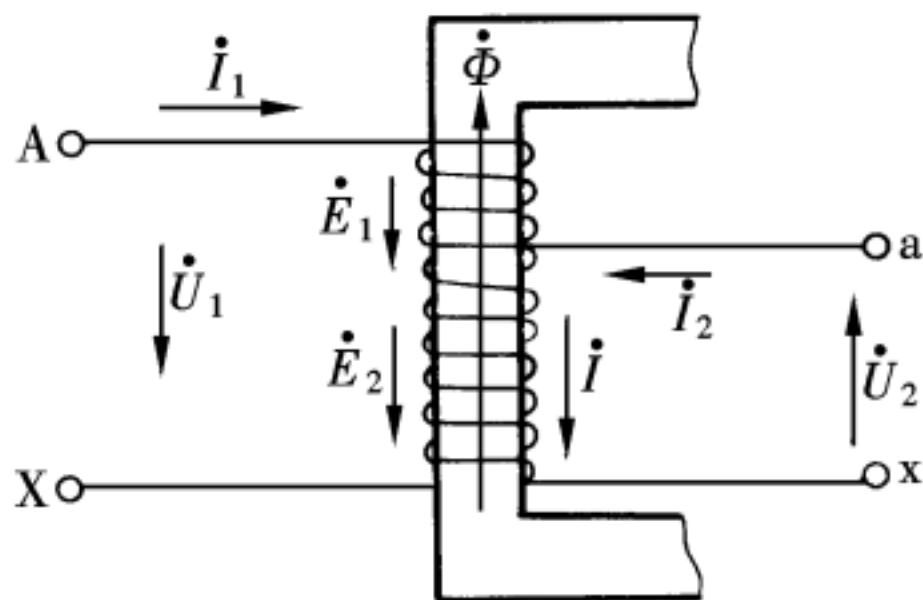
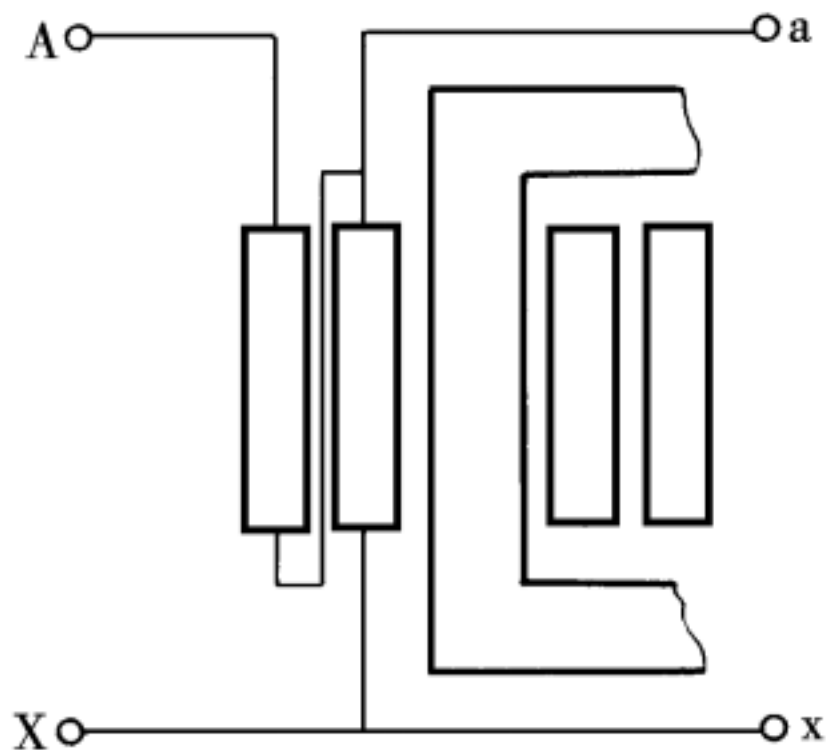
容量配合

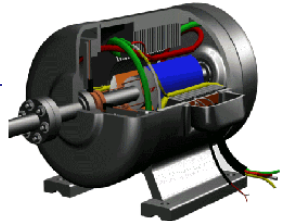
- 容量——绕组通过功率的能力
- 三绕组变压器有一个初级侧和二个次级侧。**两个次级侧的负载分配无固定关系**
- 只要两个次级侧电流各自不超过额定值，两个次级侧电流归算至初级侧的相量和的值不超过初级侧额定电流，各种运行的配合都是允许的
- 通常采用变压器高压绕组的额定容量作为各绕组的容量基值



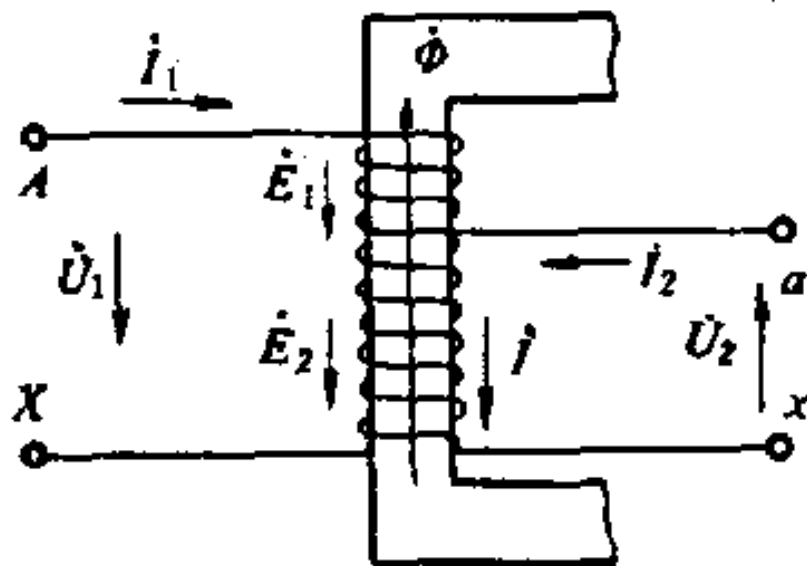


双绕组变压器的高压绕组和低压绕组串联连接
便成为自耦变压器





- 自耦变压器的结构特点
 - 双绕组变压器的一侧绕组作为自耦变压器的公共绕组，为初、次级侧所共有
 - 另一侧绕组作为自耦变压器的串联绕组，串联绕组与公共绕组共同组成自耦变压器的高压绕组。
 - 自耦变压器可作为升压变压器运行，也可作为降压变压器运行。





- 基本方程式:

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_{Aa} - \dot{U}_2 = -\dot{E}_1 - \dot{E}_2 + \dot{I}_1 Z_{Aa} + \dot{I} Z_{ax}$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I} Z_{ax}$$

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2$$

- 自耦变压器的变比:

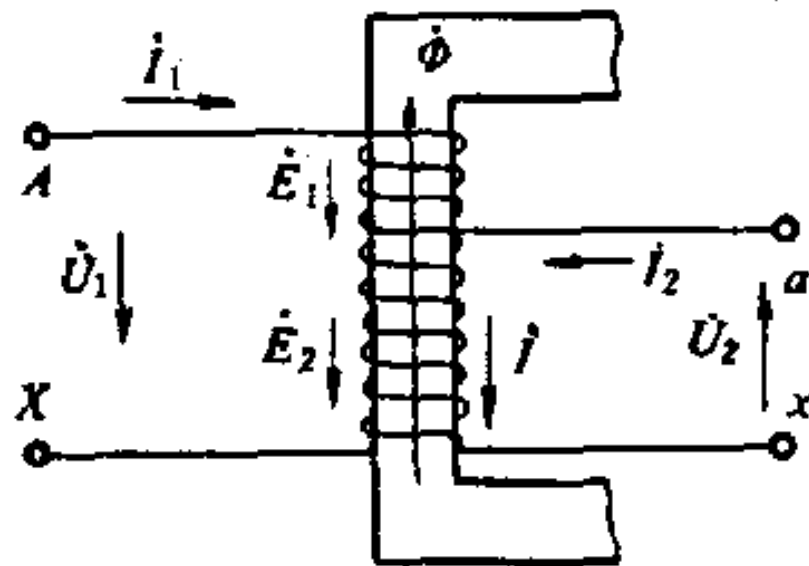
$$K_A = \frac{E_1 + E_2}{E_2} = \frac{N_{Aa} + N_{ax}}{N_{ax}}$$





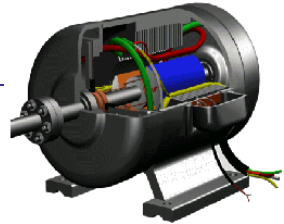
- 磁势平衡关系

$$\begin{aligned} \dot{I}_0(N_{Aa} + N_{ax}) \\ &= \dot{I}_1 N_{Aa} + \dot{I} N_{ax} \\ &= \dot{I}_1(N_{Aa} + N_{ax}) + \dot{I}_2 N_{ax} \end{aligned}$$



$$\Rightarrow \dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 \frac{N_{ax}}{N_{Aa} + N_{ax}} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 \frac{1}{K_A} = \dot{I}'_2 + \dot{I}_1$$





• 电压分析

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{E}_2 + \dot{I}_1 Z_{Aa} + \dot{I} Z_{ax}$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I} Z_{ax}$$

$$\dot{U}'_2 = K_A \dot{U}_2 = K_A \dot{E}_2 - \dot{I} K_A Z_{ax} = \dot{E}_1 + \dot{E}_2 - \dot{I} K_A Z_{ax}$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 + \dot{U}'_2 &= \dot{I}_1 Z_{Aa} + \dot{I}(1 - K_A) Z_{ax} \\ &= \dot{I}_1 [Z_{Aa} + (1 - K_A) Z_{ax}] + \dot{I}'_2 K_A (1 - K_A) Z_{ax} \end{aligned}$$

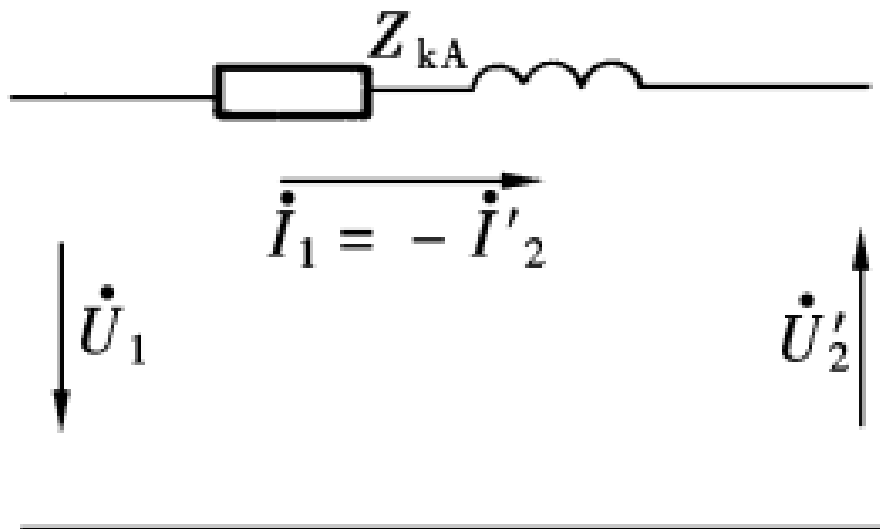
略去激磁电流，则 $\dot{I}_1 = -\dot{I}'_2$

$$\dot{U}_1 + \dot{U}'_2 = \dot{I}_1 [Z_{Aa} + (1 - K_A)^2 Z_{ax}] = \dot{I}_1 Z_{KA}$$





- 简化等效电路



$$\dot{U}_1 + \dot{U}'_2 = \dot{I}_1 [Z_{Aa} + (1 - K_A)^2 Z_{ax}] = \dot{I}_1 Z_{KA}$$





令串联绕组与公共绕组之比为 k

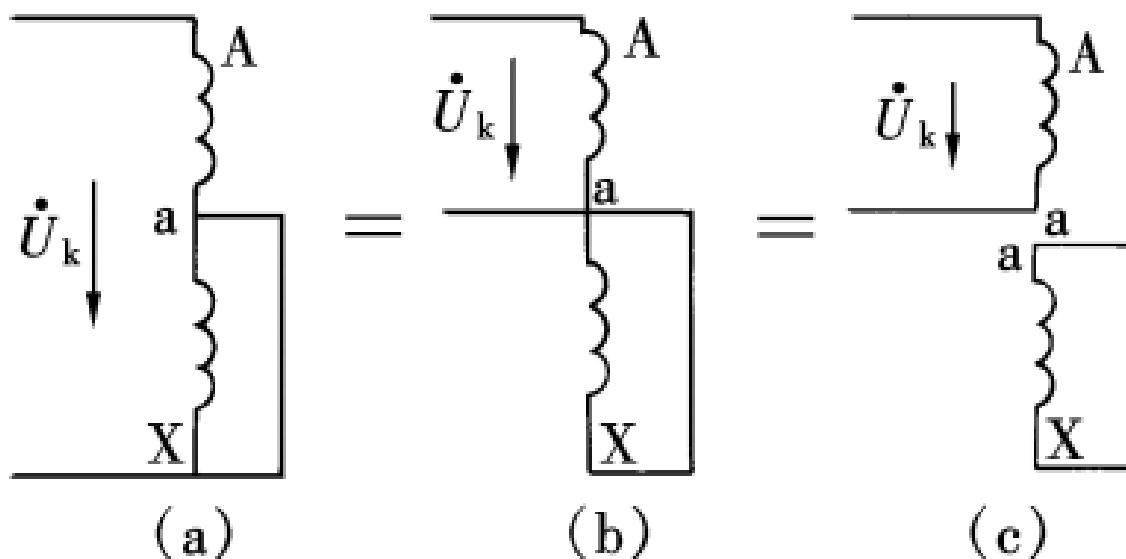
则：

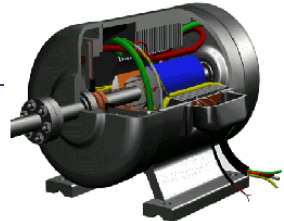
$$k = \frac{N_{Aa}}{N_{ax}} = \frac{N_{Aa} + N_{ax} - N_{ax}}{N_{ax}} = k_A - 1$$

令短路试验测得双绕组变压器短路阻抗为 Z_k

则：

$$Z_{kA} = Z_{Aa} + (k_A - 1)^2 Z_{ax} = Z_{Aa} + k^2 Z_{ax} = Z_k$$





标称容量和电磁容量

• 自耦变压器初级、次级绕组间有电和磁的双重联系。从初级侧到次级侧，一部分通过绕组间电磁感应传递功率，一部分直接传导功率。铭牌额定容量是二者之和
串联绕组的额定容量为

$$S_{AaN} = U_{AaN} I_{1N} = U_{1N} \left(1 - \frac{1}{k_A} \right) I_{1N} = \left(1 - \frac{1}{k_A} \right) S_N$$

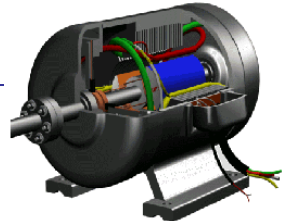
公共绕组的额定容量为

$$S_{axN} = U_{2N} I_{axN} = U_{2N} \left(1 - \frac{1}{k_A} \right) I_{2N} = \left(1 - \frac{1}{k_A} \right) S_N$$

结论： 传导容量占标称额定容量的 $1/k_A$ ，绕组额定容量是铭牌标称额定容量的 $(1-1/k_A)$ 倍。

串联绕组和公共绕组可看做是双绕组变压器的两侧绕组，对双绕组变压器有两侧绕组容量相同，显然串联和公共绕组的容量也相同





自耦变压器的优缺点

(一) 节省材料

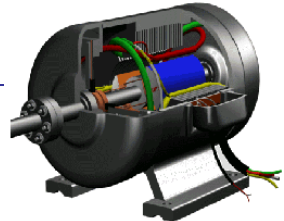
变压器的重量和尺寸是由绕组容量决定的。与普通双绕组变压器相比，在相同的标称容量情况下，自耦变压器有较小的绕组容量。

(二) 效率较高

(三) 有较小的电压变化率和较大的短路电流

(四) 需有可靠的保护措施





• 目的

- ①扩大常规仪表的量程；
- ②使测量回路与被测系统隔离，以保障工作人员和测试设备安全；
- ③由互感器直接带动继电器线圈，为各类继电保护提供控制信号，也可以经过整流变换成直流电压，为控制系统或微机控制系统提供控制信号。

• 规格和指标

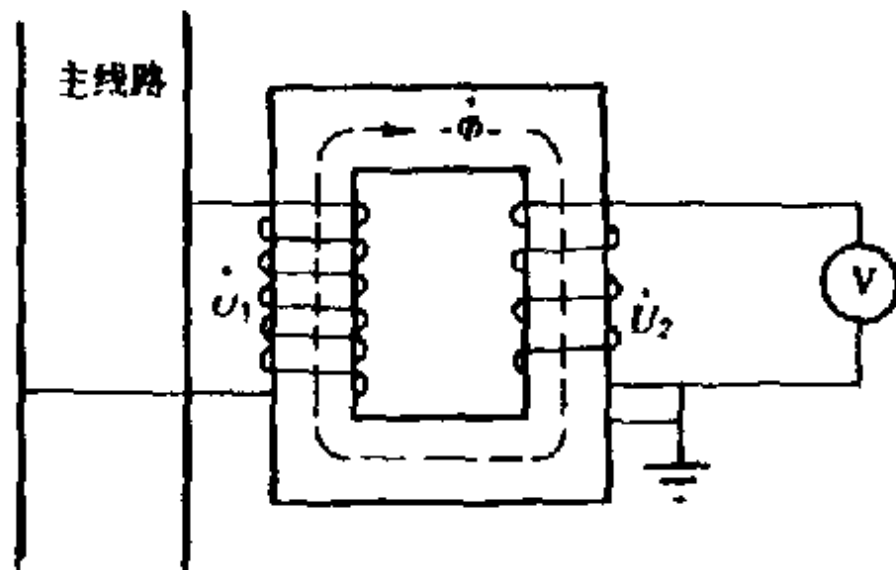
- 测量系统使用的电压互感器，其次级侧额定电压都统一设计成100V；电流互感器次级侧额定电流都统一设计成5A或1A。
- 互感器主要性能指标是测量精度，要求转换值与被测量值之间有良好的线性关系。
- 电压互感器规定了0.2、0.5、1、3等四个标准等级
- 电流互感器分为0.2、0.5、1.0、3.0和10.0 五个标准等级





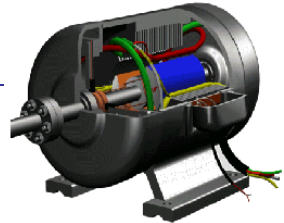
- 电压互感器

- 高压绕组接到被测量系统的电压线路上，低压绕组接到测量仪表的电压线圈。
- 如仪表的个数不止一个、则各仪表的电压线圈都应并联



电压互感器原理图





电压互感器的误差来源

- 变比误差：指 U'_2 与 U_1 的代数差值。负载的大小与所接仪表的数量有关，电压互感器本身有激磁电流和漏阻抗压降存在。这时， $U'_2 \neq U_1$ ，出现变比误差。
- 相角误差： U_2 与 U_1 不同相，相角误差表示为 $-U_2$ 与 U_1 的相位差。

减小误差的措施

- 使用——要求测试仪表有高阻抗，次级侧电流较小，接近于空载状态。电压互感器所能连接的仪表数量要受额定容量的限制。
- 制造——减小互感器的激磁电流和漏阻抗。

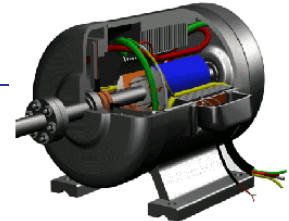
铁芯通常采用铁耗小的高级硅钢片；

磁路应处于不饱和状态，工作磁密一般为0.6—0.8T；

使磁路有较小的间隙；

采用较粗导线以减小电阻，使有较小的漏阻抗。





特别注意

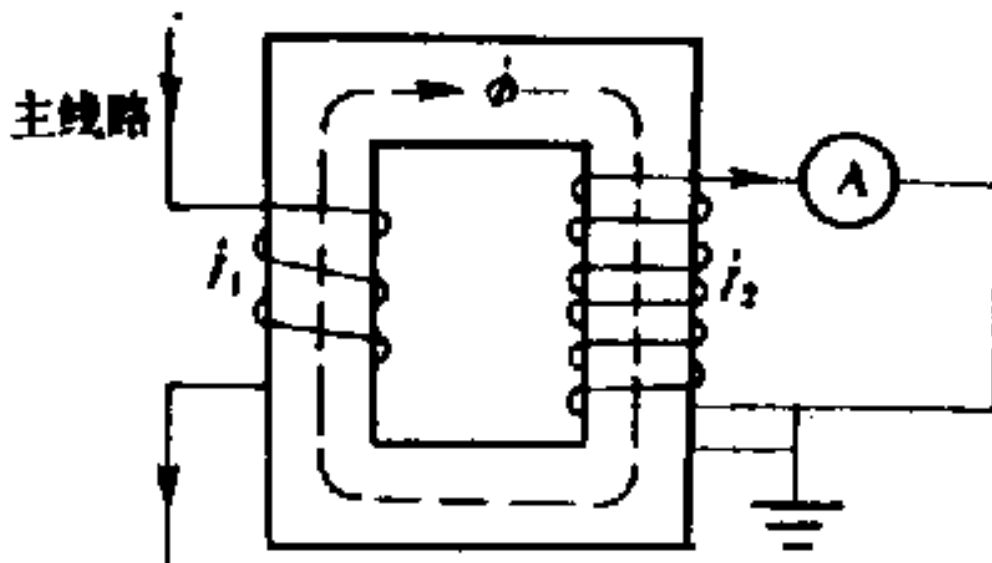
- ①次级侧绝对不允许短路，因短路电流将引起绕组发热，有可能破坏绕组绝缘电阻，导致高电压侵入低压回路，危及人身和设备安全。
- ②互感器铁芯和次级绕组的一端必须可靠接地

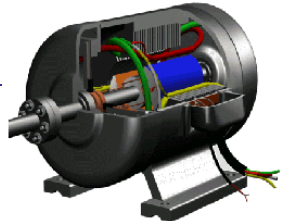




电流互感器

- 初级绕组匝数较少，一般只有一匝或几匝，而次级绕组的匝数较多。
- 初级绕组串联在被测线路中，次级绕组接至电流表，或功率表的电流线圈，或电度表的电流线圈。
- 各测量仪表的电流线圈应串联连接。由于电流线圈的电阻值很小，电流互感器可视为处于短路运行状态的变压器。





特别注意

①不允许电流互感器的次级侧开路

次级侧开路，初级侧电流将全部为激磁电流，使铁芯过饱和，铁耗将急剧增大，引起互感器严重发热。

次级绕组匝数较多，次级绕组突然开路，将感应较高的电压，对操作人员有极大危险。

②电流互感器次级绕组的一端以及铁芯均应可靠接地。

